

学校编码: 10384
学 号: 25320131151812

分类号_____密级_____
UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于监测数据的运营实桥振动特性研究

Study on Vibration Characteristic of Operational Bridge
Based on Monitoring Data

何文朋

指导教师姓名: 雷家艳 助理教授

专 业 名 称: 建筑与土木工程

论文提交日期: 2016 年 04 月

论文答辩时间: 2016 年 05 月

学位授予时间: 2016 年 06 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2016 年 06 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

桥梁结构监测系统能够对结构进行实时自动的状态监测,为评价运营桥梁的承载能力、使用功能和安全可靠性提供数据基础。近年来因为缺乏科学监测与管理所引起的桥梁垮塌事故频频发生,因此有必要利用监测数据对重要大桥的结构运营状态进行评估。本文基于厦门天圆大桥结构监测系统的实测数据,对中承式梁拱组合桥型的振动特性进行研究,重点包括大桥的模态参数识别与短吊杆疲劳寿命估计两方面。本文主要工作内容如下:

首先,阐述了桥梁结构监测系统与模态分析方法的发展现状,总结了中承式拱桥结构特点与短吊杆疲劳问题。系统介绍了自然激励技术与特征系统实现算法理论,讨论了系统阶次确定与剔除虚假模态的方法,并对比分析了天圆大桥已有的模态参数识别情况与不足。

其次,利用天圆大桥实测振动响应数据通过 NExT/ERA 方法识别了大桥模态参数,根据奇异值分解法与稳定图法对系统进行定阶,并将模态参数识别结果、有限元模型结果与其他商业软件参数识别结果进行了比较。在算法过程中讨论了 Hankel 矩阵参数选取问题与不同交通荷载激励下的模态参数识别情况,并统计了一天中随温度变化下结构自振频率的变化情况。

最后,利用雨流计数法将天圆大桥短吊杆实测应变数据进行应力幅水平及频次分布的随机概率统计,基于线性疲劳累积损伤准则,采用我国钢结构设计规范 GB50017-2003 和 Eurocode3 规范的疲劳分析方法计算出该桥短吊杆的疲劳寿命估算值,比较了基于不同时长统计数据的短吊杆寿命估算值的变化情况,结果表明最短的疲劳寿命仅为 35 年。

论文以运营实桥的结构监测数据为基础,对随机外荷载作用下大桥的结构模态参数识别方法及梁拱组合体系中短吊杆的疲劳寿命评估开展了分析和研究,论文核心问题的解决方法及结论对随机振动下实桥的动力模态参数测试及短吊杆疲劳问题监测起到了良好的工程应用参考作用。

关键词: 结构监测; 模态参数识别; 短吊杆; 疲劳寿命; 自然激励技术; 特征系统实现算法

Abstract

The bridge structure monitoring system can monitor the structure operational status in real time, which can provide data for the evaluation of bridge bearing capacity, function and operating safety. In recent years, bridge collapse accident occurred frequently because of the lack of scientific monitoring and management, so it is necessary to use the monitoring data to evaluate the operational status of the important bridge. This paper is based on the measured data of the Xiamen Tianyuan bridge structure monitoring system, researching the half-through arch bridge vibration characteristics. The focus includes the identification of the modal parameters and fatigue life estimation of short suspender. The main work includes:

Firstly, elaborating the development status of bridge structure monitoring system and modal analysis method, and summing up the structure characteristics and the fatigue problem of short suspender in the half-through arch bridge. Then introducing theory of Natural Excitation Technique and Eigensystem Realization Algorithm, discussing the determination of system order and method for eliminating false mode, and comparing the existing modal parameter identification of Tianyuan bridge.

Secondly, identifying the bridge modal parameters by using the NExT/ ERA method and the Tianyuan bridge measured data, and determining the system order by using Singular Value Decomposition and Stabilization Diagram. Then the results of modal parameter identification are compared with the finite element model and the commercial software modal parameter identification results; In the algorithm process, discussing the parameter selection of Hankel matrix and model parameter identification under different traffic load conditions, and figuring out the change of structure frequency under the change of temperature in one day.

Finally, the frequency-amplitude statistics distribution of stress history is respectively calculated basing on monitoring data of Tianyuan bridge short suspender using the rain flow counting method. Then based on linear fatigue damage accumulation rule, the fatigue life estimation of short suspender was calculated by

the fatigue analysis method of the steel structure design code GB50017-2003 and Eurocode3. Comparing the fatigue life estimation of short suspenders based on different length of statistical data. Results show that the shortest fatigue life is only 35 years.

This paper is based on the structure monitoring data of operational bridge, researching on the bridge structural modal parameter identification method and fatigue life evaluation of the half-through arch bridge short suspender. The solution and conclusion of the core problem in the paper play a good role in engineering applications for dynamic modal parameter test of real bridge under random vibration and fatigue problem monitoring of short suspender.

Keywords: Structural monitoring; Modal parameter identification; Short suspender; Fatigue life; Natural Excitation Technique; Eigensystem Realization Algorithm

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第一章 绪论.....	1
1.1 选题背景.....	1
1.2 桥梁结构监测系统发展现状.....	2
1.3 桥梁模态分析方法研究现状.....	5
1.3.1 模态分析方法简介.....	5
1.3.2 基于环境激励下的模态分析方法研究现状.....	6
1.4 中、下承式拱桥短吊杆疲劳问题.....	9
1.4.1 工程背景.....	9
1.4.2 中承式拱桥的结构特点.....	10
1.4.3 中、下承式拱桥短吊杆疲劳破坏分析.....	11
1.5 论文主要研究内容.....	13
第二章 基于环境激励下的结构模态参数识别理论.....	14
2.1 自然激励技术 (NExT)	14
2.1.1 脉冲响应函数.....	15
2.1.2 互相关函数.....	16
2.2 特征系统实现算法 (ERA)	18
2.2.1 状态方程: 连续时间模型与离散.....	19
2.2.2 Hankel 矩阵的构造.....	21
2.2.3 特征系统实现算法 (ERA) 实现过程.....	22
2.3 模态参数的确定.....	24
2.3.1 模态参数.....	24
2.3.2 复模态到实模态转换.....	26
2.3.3 系统阶次的确定.....	26
2.3.4 模态幅值相干系数 (MAC) 和模态相位共线性 (MPC)	28

2.3.5 算法程序说明.....	30
2.4 天圆大桥结构模态参数识别已有情况.....	31
2.5 本章小结.....	33
第三章 运营实桥模态参数识别.....	34
3.1 天圆大桥结构监测系统.....	34
3.2 天圆大桥有限元模型.....	37
3.3 自然激励技术 (NExT)	38
3.4 特征系统实现算法 (ERA) 模态参数识别.....	39
3.4.1 Hankel 矩阵参数选取.....	39
3.4.2 系统定阶与模态参数.....	42
3.4.3 数据选取.....	44
3.4.4 横向模态参数识别.....	47
3.4.5 模态参数识别结果对比.....	48
3.4 日温度变化对结构自振频率影响.....	55
3.4 本章小结.....	58
第四章 短吊杆应力幅频谱统计及疲劳分析.....	60
4.1 疲劳概论.....	60
4.1.1 疲劳现象.....	60
4.1.2 疲劳性能.....	60
4.1.3 荷载类型.....	61
4.2 应力幅水平及频次分布的随机概率统计.....	61
4.3 疲劳寿命估算理论.....	63
4.3.1 线性疲劳累积损伤准则.....	63
4.3.2 采用 GB50017-2003 的疲劳分析.....	65
4.3.3 采用 Eurocode3 与 JTG D64-2015 的疲劳分析.....	66
4.4 短吊杆监测数据的统计分析及疲劳寿命估算.....	69
4.5 本章小结.....	75
第五章 结论与展望.....	76

5.1 论文工作总结.....	76
5.2 工作展望.....	77
参考文献.....	78
致谢.....	83
作者攻读硕士学位期间撰写的论文.....	84

Contents

Abstract in Chinese.....	I
Abstract in English.....	II
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Research background.....	1
1.2 Development status of bridge structure monitoring system.....	2
1.3 Research status of bridge modal analysis method.....	5
1.3.1 Introduction of modal analysis method.....	5
1.3.2 The research status of model analysis method under ambient excitation.....	6
1.4 Fatigue problem of short suspenders of half-through or through arch bridge.....	9
1.4.1 Engineering background.....	9
1.4.2 Structure characteristics of half through arch bridge.....	10
1.4.3 Fatigue failure analysis of short suspenders of half-through or through arch bridge.....	11
1.5 Main work of this paper.....	13
Chapter 2 The model parameter analysis theory under ambient excitation.....	14
2.1 Natural Excitation Technique (NExT)	14
2.1.1 Impulse response function.....	15
2.1.2 Cross correlation function.....	16
2.2 Eigensystem Realization Algorithm (ERA)	18
2.2.1 State equation: continuous time model and discrete time model.....	19
2.2.2 Hankel matrix structure.....	21
2.2.3 The process of Eigensystem Realization Algorithm (ERA)	22

2.3 Determination of modal parameters.....	24
2.3.1 Modal parameter.....	24
2.3.2 Convert complex mode to real mode.....	26
2.3.3 The order determination of systems.....	26
2.3.4 Modal amplitude coherence (MAC) 和 Modal Phase Criterion (MPC)	28
2.3.5 Algorithm program instructions.....	30
2.4 The existing modal parameter identification of Tianyuan bridge.....	31
2.5 Conclusions of this chapter.....	33
Chapter 3 Modal parameter identification of operational bridge.....	34
3.1 Structure monitoring system of Tianyuan bridge.....	34
3.2 Finite element model of Tianyuan bridge.....	37
3.3 Natural Excitation Technique (NExT)	38
3.4 Modal parameter identification of Eigensystem Realization Algorithm (ERA)	39
3.4.1 Parameters selection of Hankel matrix.....	39
3.4.2 The order determination of systems and modal parameter.....	42
3.4.3 Data selection.....	44
3.4.4 Lateral modal parameter identification.....	47
3.4.5 Comparison of the results of modal parameter identification.....	48
3.4 Effect of temperature change on natural frequency of structure.....	55
3.4 Conclusions of this chapter.....	58
Chapter 4 Stress-time history statistic analysis and fatigue life estimation of short suspender.....	60
4.1 Introduction to fatigue.....	60
4.1.1 Fatigue phenomenon.....	60
4.1.2 Fatigue properties.....	60
4.1.3 Load type.....	61
4.2 Stress-time history statistic analysis.....	61

4.3 The theory of fatigue assessment.....	63
4.3.1 Linear fatigue damage accumulation rule.....	63
4.3.2 Fatigue life analysis according to the steel structure design code.....	65
4.3.3 Fatigue life analysis according to Eurocode3 and JTG D64-2015.....	66
4.4 Monitoring data Statistic analysis and fatigue life estimation of the monitoring data of short suspender.....	69
4.5 Conclusions of this chapter.....	75
Chapter 5 Conclusions for this paper.....	76
5.1 Conclusions of this paper.....	76
5.2 Further study of this study.....	77
References.....	78
Acknowledgement.....	83
List of Publications.....	84

第一章 绪论

1.1 选题背景

随着桥梁在交通运输中占据日益重要的地位,桥梁设计理论和施工技术的不断进步使得桥梁跨度不断有新的突破,结构形式也日趋复杂。但是,目前中、老龄桥梁在国内陆路交通网络中占相当的比重,随着桥龄的增长,由于环境、气候等不可预测因素的作用、日益增加的交通量及重车、超重车过桥数量的不断增加和人为事故等因素,不少桥梁已出现严重的功能退化的情况,这都对运营桥梁的结构监测与安全养护提出了更高的要求。

近年来,国内由于缺乏科学监测与管理所引起的桥梁垮塌事故屡见不鲜。如广州海印桥的部分斜拉索因锈蚀而突然断裂,济南黄河公路大桥的斜拉索也发生严重锈蚀而被迫提早更换,宜宾小南门金沙江拱桥吊杆断裂造成人车坠入江中;辽宁盘锦田台庄大桥挂梁突然落下,坠入辽河。在国外,大型桥梁的突然倒塌与破坏事故也频发不断,如 1994 年韩国汉城圣水大桥在上班时刻跨中央断塌 50m,造成 32 人死亡,17 人重伤的重大事故;2007 年 7 月,美国明尼苏达州首府横跨运河的大桥在交通高峰期间突然坍塌,造成 8 人死亡,100 余人受伤的重大事故。如今,在进行大规模的交通基础设施建设的同时,大量路桥的维修、加固和改造也异常关键。国内由于桥梁老化、超载、设计与施工存在缺陷、损伤、自然灾害以及监测与养护管理不力等原因,危桥数量不断增长,现在每年用于危、旧桥梁改造加固的费用在飞快增长,而且还远远不能满足实际需求。

从上世纪 80 年代末期以来,世界各国的工程与研究领域专家增强了对结构安全性及耐久性的重视,结构监测系统开始投入实际结构使用阶段。随着计算机技术、传感技术和通讯技术的发展,当前的结构监测系统^[1-2]可以对结构在不同运营环境下的结构响应进行实时、连续不断的监测,对桥梁而言,能够为其在特殊气候与交通荷载情况下的桥梁异常运营状况发出预警信号,为桥梁的维护和管理提供依据,同时能够为评价运营桥梁的承载能力、使用功能和安全可靠性提供数据基础。目前结构监测系统致力于自动识别结构损伤,以对结构的安全健康状态作出实时且精确的评价,以此避免潜在的危险事故发生,这对预防桥梁因结构灾害而造成重大公共安全事故的发生具有重大意义。但是不成熟的理论、多变复杂的环境激励、噪声干扰严重的的数据、寿命较短的传感器等因素都对结构监测系

统的实际应用有很大的阻碍，结构监测系统还有很多要发展之处。

本论文利用厦门天圆大桥在线监测系统，对大桥单拱面中承式刚性吊杆梁拱组合桥型结构主要关注了以下两个方面：（1）在随机外荷载作用下，研究一种能够实时、快速、准确识别结构模态参数的方法，（2）分析了大桥刚性短吊杆的疲劳问题，对其在沿海环境下寿命进行了评估；这些工作与成果对于随机振动下实桥的动力模态参数测试与短吊杆疲劳问题监测起到了良好的工程应用参考作用。

1.2 桥梁结构监测系统发展现状

随着计算机技术、通讯技术、传感技术以及结构振动分析理论的迅速发展，近年来桥梁运营状态下结构监测与状态评估已成为国内外工程界和学术界所研究的热点。传感器的革新与远程监控技术的更新换代，使得桥梁结构监测系统与安全评价系统正向经济可行、简单易装、持久可靠的方向发展，并已在世界许多大桥中得到应用。

结构监测系统包括硬件和软件 2 个部分，其中硬件部分包括 4 个系统，即：传感器系统；数据采集与传输系统；数据处理与控制系统；结构状况评估系统，数据可通过光纤网络远程传输而进行处理与存储^[3-5]。结构监测系统的构成见下图 1.1 所示。



图 1.1 结构监测系统

自十九世纪八十年代中后期，国外首先开始于多座桥梁上布置监测传感器，以来监测环境荷载、结构振动和局部应力状态。例如 1987 年在佛罗里达的 Sunshine Skyway 桥布设了约 500 个传感器以用来验证设计假设，监测施工质量以及在大桥运营过程中的状态变化；1987 年，英国于总长 522m 的三跨连续刚箱梁 Foyle 桥上安装传感器，监测大桥在环境激励作用下主梁的振动、挠度和应变等响应，同时监测风荷载与结构温度变化，该系统为早期监测系统中较为全面的，

它实现了大桥的实时监测、实时数据分析和实时远程查看。其他典型实例如日本的明石海峡大桥，丹麦的 Great Skyway Bridge，英国的 Flintshire 斜拉桥等等。

国内从十九世纪 90 年代开始逐渐在大桥中安装结构监测系统。香港青马大桥为桥长 2160 米、主跨 1337 米的公路、铁路两用悬索桥，于 1997 年先一批在大桥上安装了规模较大的结构结构监测系统，该系统包括风、车辆和温度等荷载和环境作用监测系统，是我国应用最早，功能较为全面的结构监测系统之一^[6]。

上海徐浦大桥于 1999 年综合监测系统中实施的实时自动监测项目包括：车辆荷载监测（1 个车道）、温度监测（20 点）、挠度监测（5 点）、桥梁振动监测（16 点）、应变监测（20 点）、斜拉索振动与索力监测（4 根斜拉索）等，其他项目由桥梁管理部门进行的日常检测作为补充。其他典型实例包括如上海徐浦大桥，山东东营黄河公路大桥、哈尔滨松花江大桥、广东虎门大桥、江阴长江大桥、芜湖长江大桥、上海卢浦大桥等。润扬长江大桥、苏通大桥等特大型桥梁在施工阶段已开始传感器的安装，一方面用于施工监控，另外考虑长期的结构监测，便于未来运营期间的实时监测与预警。福建省内已建立结构监测系统的公路桥梁比较少，仅下白石大桥、乌龙江大桥及海沧大桥等建立了结构监测系统^[7-9]。图 1.2-图 1.5 为已安装结构监测系统的实桥图。



图 1.2 青马大桥



图 1.3 徐浦大桥



图 1.4 下白石大桥

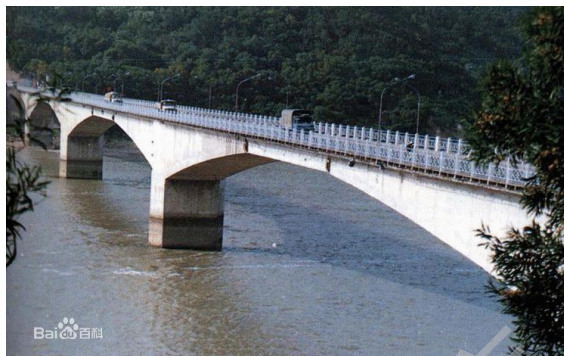


图 1.5 乌龙江大桥

桥梁监测的基本目的是通过对桥梁结构状态的监控与评估,为桥梁在特殊气候、交通条件下或桥梁运营状况异常时发出预警信号,诊断可能发生结构损伤,以便及时采取养护维修措施,其主要特点有:

- (1) 实时性: 能够实时把握桥梁结构运营阶段的工作状态,把握关键时刻影响;
- (2) 自动性: 能够远程获取实时在线信息,自动保存并处理数据;
- (3) 整体性: 可以大范围布置传感器进行监测,识别结构损伤以及评定结构的安全性、可靠性与耐久性;
- (4) 简便性: 安装成功后,即可实现长期监测,大大提高检测效率,减小工作量。

虽然结构监测系统发展迅猛,但桥梁结构监测系统作为一个正在逐渐被学术界和工程界广泛接受并应用的新课题,在目前的实际工程应用实践中,尚存在一些比较普遍的问题:

- (1) 缺乏统一标准,系统规模差异性较大,传感器选型与布设合理性有待商榷;
- (2) 系统本身的使用寿命往往难以达到设计年限,其中传感器和传输线路能否长期使用是整个系统使用寿命的关键环节;
- (3) 面对复杂多变的环境,数据噪声干扰难以消除,降低了数据的可靠性;
- (4) 系统能够实时存储结构状态数据,但也造成了如何对海量数据进行有效处理分析的难题,否则容易造成数据灾难;
- (5) 理论与结构监测系统的有机结合需要加强,桥梁结构监测领域涌现了大量的研究论文,但目前绝大部分理论并不能有效应用于工程实践。

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.